









源変動要因として考えられ、ファイバー分光器へのカップリング時の振動による検出強度の変動が測定器側の要因として挙げられる。これらをまとめて、レーザー強度変動と呼び、和(i)+(ii)の変動そのものであるとシンプルに考えて10%だとする。他に残る唯一の変動要因は、プローブレザーと電子ビームの相対的位置変動(ただし、2つのE0結晶を結んだ線上に射影した相対的位置変動である)と考えられるので、この変動は8%と計算される。もし、この要因を電子ビームの位置変動であるとし、光源レーザーのフォトカソード上の位置変動のみに依ると仮定すると、E0結晶位置で $80\mu\text{m}$  (rms)となる。カソード位置でのレーザーのポインティングは $30\mu\text{m}$  (rms)以下であることを考え合わせると、プローブ光の変動要因は無視できないと推察される。

## 4. 実証結果のまとめと今後の計画

### 4.1 実験結果のまとめ

本実証試験により複数のE0結晶を配置して、単一のレーザー光で同時にプローブするEOSが可能であることを世界で初めて提唱<sup>[5]</sup>し、且つ実証した。しかし、実用に耐える3次元EOSで電子ビームバンチ内の3次元的な電荷分布を高分解能で実現するには以下に述べる項目について改善・検討の必要がある。

- 分光器の暗電流ノイズが $\pm 20$  counts (E0信号強度の20%)あるため、冷却型分光器を使用して暗電流を抑制する必要がある。暗電流を一桁減らせば、S/Nは0.2%になる。このとき、XFELでは信号強度が一桁強いので結晶をビーム軸から1cm以内に置けば、ビーム位置の空間分解能は $20\mu\text{m}$ 程度の精度で計測可能。
- 円環プローブレザーの強度ムラ、スペクトル強度分布変化など、現状ではまだリアルタイム性に問題あり。プローブ光はスペーシャル・フィルターなどにより高品質化が必要。
- ラジアル偏光の純度(消光比に関係)がまだ足りない。既に全体の消光比が5桁の光学系をこの対策として開発。E0結晶の品質(偏光特性を含めた光学的均一性)が課題。
- 時間分解能で30 fs (FWHM)を切るには、プローブレザーと電子ビームのタイミング・ジッターが60 fs (rms)以下(8信号同時計測では20 fs以下)を要求。ただし、対応できる高速応答のE0結晶(材料開発)が必要。
- トランスバースの電荷分布形状計測は現状の8個のポッケルスE0結晶では、簡単なビームの対称性を議論する程度。外形を把握するには連続点で計測が必須。そのためにはカー効果(2次の電気光学(E0)効果)を利用する必要がある(図1の(a))。カー効果は電界の自乗に比例するため、アモルファスを用いることで最低次のE0効果として利用可能。XFELでは信号強度が一桁以上強いので、カー効果によるE0信号は十分に観測されると予想する。

以上で述べた項目で、時間およびトランスバース方向の分解能の向上に関する開発計画を述べる。

### 4.2 時間分解能をフェムト秒に上げるための開発

10 fs オーダーの応答性のある素子の材料として、有機材料がある。有機分子には $\pi$ 電子が存在するために高速応答することが予想され、実際に我々が有望視しているポリジアセチレン誘導体(DAST)では30 fs以下の応答性が確認されている<sup>[8]</sup>。ZnTeやGaPと比較して、非線形係数が高く、広帯域(1-30 THz)で使用可能であるため、フェムト秒の高時間分解能化が可能になると期待される。さらに高速応答可能な、カー効果のアモルファスなどの材料探索が必要である。他のアプローチとして、実績のあるE0結晶を薄くする方法がある。厚さ $50\mu\text{m}$ のGaPであれば、80 fs (FWHM)の時間分解能が期待できる。

有機材料では特に、放射線によるカラーセンター形成などでブロードバンド性が損なわれる可能性がある。ビーム実験で用いたDASTに、可視光領域での変化はなかった。しかし、テラヘルツ領域での光学特性の変化も合わせて考慮しなければならない。

### 4.3 トランスバース方向の分解能向上への開発

フェムト秒時間分解能に対応したトランスバース方向の電荷分布形状計測には、円錐屈折現象<sup>[10]</sup>を用いたプローブ光を用いることを計画している。円錐屈折とは二軸性の複屈折結晶を用いて、そのC軸に垂直方向に通常のガウシアンビームを入射すると、円錐状に立体的に屈折してコリメートされた円環ビームを生成できる。偏光方向を回転しながら、スパイラル状に時間シフトして円弧を描く。ブロードバンド・レーザーに $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ を用いて円錐屈折ビームの発生実験を行い、その特異的な偏光特性を調べている<sup>[11]</sup>。疑似シュテルン・ゲルラッハ装置<sup>[12]</sup>を構成してエンコーディングし、干渉計を用いたホログラフィックなスペクトログラフ<sup>[13]</sup>によりデコーディングする方法を検討している。

## 参考文献

- [1] H. Ego, et al., *Proc. of EPAC 08*, Genova, Italy, 2008, 1098.
- [2] G. Berden et al., *Phys. Rev. Lett.* 99, 2007, 164801.
- [3] B. Steffen, FLS workshop, Hamburg, 18.05.2006.
- [4] H. Tomizawa, Japan Patent Application No: 2007-133046.
- [5] H. Tomizawa, et al., *Proc. of FEL 2007*, Novosibirsk, Russia, 2007, 472.
- [6] H. Tomizawa, et al., *Proc. of IPAC 10*, Kyoto, Japan 2010, 963.
- [7] H. Tomizawa, *Synchrotron Radiation in Natural Science Vol. 9, No. 1-2* (2010) 24.
- [8] Hattori T, et al., *Chem. Phys. Lett.*, 113, 1987, 230.
- [9] [http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/news/2009/09/09\\_02.htm](http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/news/2009/09/09_02.htm)
- [10] M.V. Berry, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 6, 2004, 289.
- [11] S. Matsuura, et al., *Proc. of FEL 2009*, Liverpool, UK, 2009, 269.
- [12] ファインマン物理学 V. 「量子力学」, R. ファインマン著, 砂川重信訳, 岩波書店, p97-115
- [13] H. Tomizawa, et al., *Applied Surface Science* 235/1-2, (2003) 214.